

УДК 523.042

О СОДЕРЖАНИИ ЖЕЛЕЗА И ЦИНКА В ЗВЕЗДАХ С НИЗКОЙ МЕТАЛЛИЧНОСТЬЮ

У.Ш. Баязитов

Аннотация

Произведены не-ЛТР-оценки содержания железа и цинка у двух групп звезд с низкой металличностью. Установлено, что не-ЛТР-поправки к содержанию этих элементов линейно растут с уменьшением $[\text{Fe}/\text{H}]$. Анализируются зависимости $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$. Обнаружен нарастающий тренд в относительном содержании цинка с уменьшением металличности в широком диапазоне от 0 до -5 .

Ключевые слова: звезды с дефицитом металлов, не-ЛТР-расчеты спектров звезд, содержание химических элементов в звездах.

Введение

Изучение звезд с экстремально низким содержанием металлов позволяет «заглянуть» в процесс синтеза химических элементов на заре возникновения Вселенной и проверить теории нуклеосинтеза.

В работах [1, 2] изучалось поведение относительного содержания цинка $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ от металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ для звезд-гигантов нашей Галактики, где

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log(\text{Fe}/\text{H})_{\star} - \log(\text{Fe}/\text{H})_{\odot},$$

$$[\text{Zn}/\text{Fe}] = \log(\text{Zn}/\text{Fe})_{\star} - \log(\text{Zn}/\text{Fe})_{\odot},$$

$\log(\text{A}/\text{H})_{\star}$ и $\log(\text{A}/\text{H})_{\odot}$ – содержание химического элемента А относительно водорода в логарифмической шкале соответственно в исследуемой звезде и Солнце.

Авторы [1, 2] не обнаружили тренда величины $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ от $[\text{Fe}/\text{H}]$ в диапазоне металличностей от -3 до 0. Однако определение содержания Zn и Fe в данных работах было проведено в допущении гипотезы ЛТР (локально-термодинамического равновесия) в атмосферах звезд.

В нашей работе [3] проведено определение содержания цинка при отказе от гипотезы ЛТР для выборки звезд из работ [1, 2], при этом были использованы собственная модель атома цинка и модели атмосфер Куруца [4]. В наши исследования были добавлены две звезды с экстремально низким содержанием металлов HR 4049 и CS 22949-037 с значениями $[\text{Fe}/\text{H}]$, равными -4.7 и -3.9 соответственно. Установлено, что не-ЛТР-отклонения возрастают с ростом эффективной температуры и практически не зависят от логарифма ускорения свободного падения. Выявлен тренд относительного содержания цинка $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ от металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$. «Переизбыток» содержания цинка нелинейно возрастает с уменьшением металличности. Это противоречит ранее полученным результатам [1, 2]. Тренд означает, что относительное содержание атомов цинка на ранних стадиях эволюции звезд значительно превышало таковое у более молодых звезд (таких, как Солнце).

Проведенное нами исследование показало важность учета не-ЛТР-отклонений при оценке содержаний химических элементов у обедненных металлами звезд. Но выводы в работе [3] были получены при ЛТР-оценках содержания железа (то есть металличности звезд) и недостаточном количестве высококачественного наблюдательного материала для звезд с предельно малыми значениями $[\text{Fe}/\text{H}]$.

В настоящей работе приводятся результаты исследований содержания цинка и железа в звездах с дефицитом металлов, выполненных при отказе от гипотезы ЛТР и с привлечением более широкой выборки звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$.

1. Модель атома железа и методика исследований

Использована наша модель атома железа, включающая 524 уровня (334 уровня Fe I, 189 уровней Fe II и один уровень Fe III). Уровни общего терма не объединялись в один (как это иногда делается для сложных атомов при не-ЛТР-расчетах) для возможности учета внутримультиплетных эффектов. Детально рассчитывались 6907 разрешенных связно-связанных перехода, а также 523 связанно-свободных перехода. Силы осцилляторов были использованы главным образом из работы [5].

Соударения с электронами для разрешенных переходов учитывались согласно формуле из [6], а для запрещенных соответственно из [7]. Ударная ионизация электронами трактовалась согласно [8]. Учитывались также соударения с нейтральным водородом в соответствии с формулой Дравина [9]. В отсутствие точных значений для ударных сечений с водородом мы принимали корректирующий коэффициент равным единице.

Крайне важные значения сечений фотоионизации приняты согласно квантово-механическим расчетам [10]. При не-ЛТР-расчетах очень важно точно рассчитывать ионизирующее излучение на различных глубинах в атмосфере звезды. На это излучение сильно влияют эффекты поглощения в спектральных линиях (так называемое бланкетирование). Бланкетирование от более чем 40000 спектральных линий 14 химических элементов учтено по нашей методике. Учитывалось также влияние двухатомных молекул (CH , CN и др.) на континуум. Оценки влияния эффектов бланкетирования при не-ЛТР-расчетах и методика исследования приведены в работе [11].

При расчете профилей спектральных линий учитывались радиационное уширение, эффекты Штарка и Ван-дер-Ваальса. В последнем случае при использовании уравнения из [12] применялся поправочный множитель согласно [13].

Тестовые расчеты с нашей моделью атома железа, моделью атмосферы Солнца [4] и общепринятым солнечным содержанием железа $\log \epsilon_{\odot} = 7.50$ показали хорошее согласие рассчитанных и наблюдаемых профилей Fe I и Fe II. При этом микротурбулентная скорость принималась равной $\xi_{\odot} = 1$ км/с.

2. Результаты

Изучение зависимости содержания цинка от металличности у звезд произведено с использованием наблюдательных данных из работ [15, 16], полученных на телескопе VLT (Чили).

Первая выборка звезд содержит 35 звезд-гигантов поздних классов из гало Галактики. Температуры T_{eff} этих звезд заключены в интервале от 4550 до 5250 К, ускорения свободного падения $\log g$ — от 0.7 до 2.7. Металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$ распределены в интервале от -2.07 до -4.19 .

Вторая выборка звезд [16] содержит 12 карликов также из гало Галактики. Параметры T_{eff} , $\log g$ и $[\text{Fe}/\text{H}]$ заключены в интервале от 6272 до 6482 К, от 4.03 до 4.27 и от -1.93 до -3.27 соответственно.

В наших расчетах использовали параметры атмосфер звезд (T_{eff} , $\log g$, $[\text{Fe}/\text{H}]$ и микротурбулентную скорость) приводимые авторами [15, 16]. Не-ЛТР-оценки содержаний цинка и железа производились далее по нашим моделям атомов модифицированного программного комплекса MULTI [14] и на основе сетки моделей атмосфер звезд [4]. После не-ЛТР-оценок содержания железа соответствующие поправки вносились в величину $[\text{Fe}/\text{H}]$.

Результаты наших исследований обсуждаются ниже отдельно для каждой выборки звезд и суммируются в заключении.

2.1. Звезды-гиганты гало. Для оценки не-ЛТР-содержания цинка использовались две линии $\lambda\lambda 4722, 4810 \text{ Zn I}$. К сожалению, в работе [15] приводятся эквивалентные ширины этих линий только для двух звезд. В остальных случаях опубликовано одно значение для более сильной линии $\lambda 4810 \text{ Zn I}$. Мы рассчитали не-ЛТР-поправки к содержанию цинка согласно формуле

$$\Delta(\text{Zn}) = \lg \epsilon(\text{Zn})_{\text{NLTE}} - \lg \epsilon(\text{Zn})_{\text{LTE}}.$$

Не-ЛТР-оправки положительны для всех рассматриваемых звезд. При металличности $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -4$ поправка равнялась $+0.35 \text{ dex}$ и линейно уменьшается до $+0.23 \text{ dex}$ при $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -2$. Однако есть звезды, отклоняющиеся от такой простой зависимости. Звезда CS 29502-042 с металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] = -3.19$ имеет поправку 0.40 dex . А у звезды CS 22873-166 с близкой металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.97$ величина $\Delta(\text{Zn}) = +0.21 \text{ dex}$. Очевидно, на отклонения от ЛТР-содержаний цинка влияют наряду с металличностью и другие факторы (индивидуальные параметры звезд и т. д.). К этому надо добавить и ошибки измерений интенсивностей линий. Здесь отметим только, что первая звезда – одна из самых горячих в выборке с $T_{\text{eff}} = 5100 \text{ K}$, а вторая – холодная с температурой 4550 K . Ранее нами было показано, что не-ЛТР-отклонения возрастают с ростом T_{eff} при фиксированном значении металличности [3].

В работе [15] измерены эквивалентные ширины 151 линии FeI и 19 линий FeII. Эти линии использовались нами для не-ЛТР-оценок содержаний железа $\lg \epsilon(\text{Fe})_{\text{NLTE}}$ и поправок к металличностям исследуемых звезд. Внутренняя погрешность оценки $\lg \epsilon(\text{Fe})_{\text{NLTE}}$ составила 0.05 dex . Как и в случае с цинком, поправки $\Delta(\text{Fe})$ положительны и возрастают линейно с уменьшением металличности. На рис. 1 слева эта зависимость представлена графически. Как видим, эта зависимость носит линейный характер с небольшим разбросом от прямой линии. Поправка равна 0.35 dex при $[\text{Fe}/\text{H}] = -4.19$, и отклонениями от ЛТР можно пренебречь при $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -2$.

С учетом наших не-ЛТР-оценок содержаний цинка и железа были изучены следующие зависимости.

1. Зависимость $[\text{Zn}/\text{Fe}]_{\text{LTE}}$ от $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{LTE}}$. Содержание рассматриваемых элементов определены в ЛТР-приближении.
2. Зависимость $[\text{Zn}/\text{Fe}]_{\text{NLTE}}$ от $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{LTE}}$. Произведена не-ЛТР-оценка содержания цинка.
3. Зависимость $[\text{Zn}/\text{Fe}]_{\text{NLTE}}$ от $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{NLTE}}$. Даны не-ЛТР-оценки содержаний железа и цинка.

Во всех случаях получен отрицательный тренд с ростом металличности звезд. На рис. 1 справа представлена зависимость $[\text{Zn}/\text{Fe}]_{\text{NLTE}}$ от $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{NLTE}}$ для звезд-гигантов из [15]. Во второй строке табл. 1 приведены коэффициенты наклона прямых, проведенных методом наименьших квадратов через исследуемые данные.

Анализ таблицы показывает, что тренд меняется для всех трех случаев. Во втором случае (не-ЛТР-оценка содержания Zn и ЛТР-оценка для Fe) коэффициент

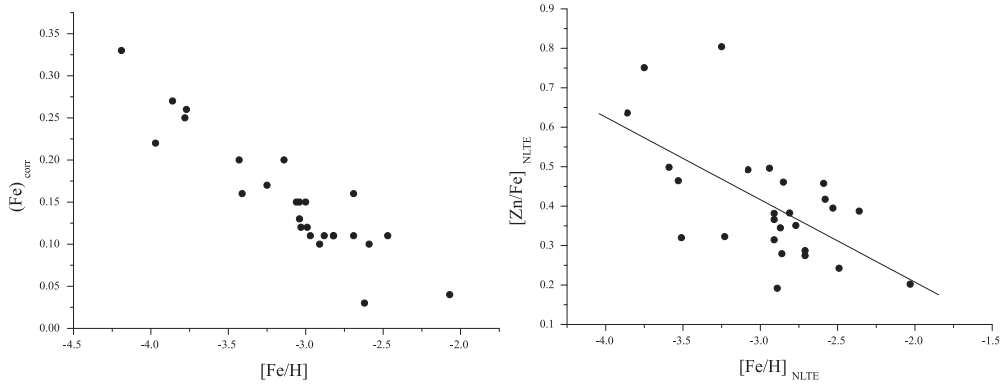


Рис. 1. Не-ЛТР-поправки к содержанию железа для звезд-гигантов [15] (слева). Справа зависимость $[Zn/Fe]_{NLTE}$ от $[Fe/H]_{NLTE}$ для них же. Наклон прямой равен -0.21

Табл. 1

Коэффициенты наклонов прямых для трех случаев

	1 случай	2 случай	3 случай
Звезды-гиганты [15]	-0.27	-0.30	-0.21
Звезды-карлики [16]	-0.33	-0.45	-0.44

максимален и равен -0.30 . В третьем случае происходит снижение тренда (коэффициент равен -0.21 , см. рис. 1).

2.2. Звезды-карлики гало. В [16] приведены эквивалентные ширины линий $\lambda\lambda 4722, 4810$ Zn I для каждой из 12 рассматриваемых звезд-карликов. Поведение не-ЛТР-поправок к содержанию цинка у этих звезд аналогично рассмотренному ранее случаю для звезд-гигантов. При $[Fe/H] = -3.0$ поправка $\Delta(Zn) = +0.34$ и при $[Fe/H] = -2.0$ линейно спадает до $+0.21$. Для одной звезды CD-71°1234 с $[Fe/H] = -3.21$ получена несколько заниженная от общей тенденции величина поправки $\Delta(Zn) = +0.33$. (Заметим, что у авторов [16] она отмечена как спектрально двойная звезда.)

Для оценки не-ЛТР-содержания железа использованы приводимые в [16] эквивалентные ширины 7 линий Fe I и 14 линий Fe II (то есть число использованных линий железа значительно меньше, чем для звезд-гигантов [15]). Как и во всех рассматриваемых случаях, не-ЛТР-поправки растут с уменьшением металличности (см. левую часть рис. 2). Максимальная поправка в 0.16 dex получена для звезды CD-24°17504 с наименьшей металличностью $[Fe/H] = -3.21$ и соответственно 0.03 dex для звезды G59-27 с $[Fe/H] = -1.93$.

Проведены исследования зависимостей $[Zn/Fe]$ от $[Fe/H]$, как и для рассмотренных ранее звезд-гигантов. Все три случая сведены в третьей строке табл. 1. При ЛТР-оценках содержания железа и цинка коэффициент наклона прямой для тренда $[Zn/Fe]$ от $[Fe/H]$ приблизительно равен случаю 1 для звезд-гигантов. Однако если рассматривать случаи 2 и 3, то картина отлична. Если тренды для звезд-гигантов меняются незначительно, то для звезд-карликов эти тренды довольно сильно увеличиваются с -0.33 до -0.45 . Это можно объяснить тем, что для звезд-гигантов не-ЛТР-поправки к содержанию цинка меньше, чем у карликов. Для карликов же не-ЛТР-поправки для железа аналогичны гигантам. Это и приводит к росту наклона тренда для карликов.

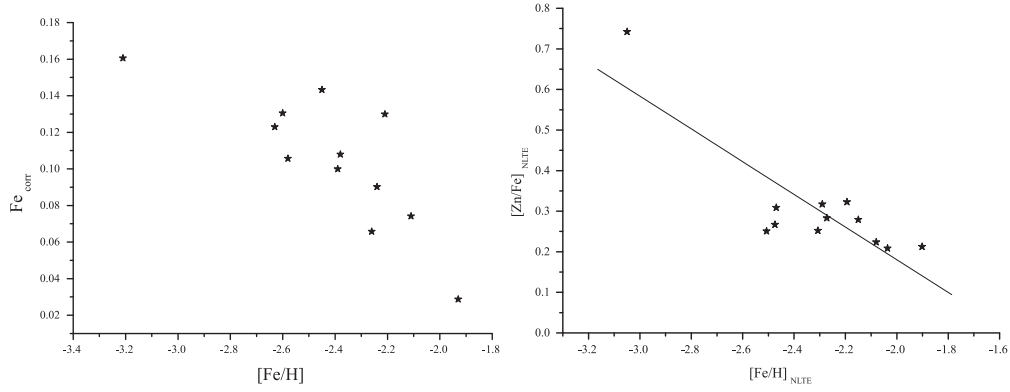


Рис. 2. Не-ЛТР-поправки к содержанию железа для звезд-карликов [16] (слева). Справа зависимость $[Zn/Fe]_{NLTE}$ от $[Fe/H]_{NLTE}$ для них же Наклон прямой равен -0.44

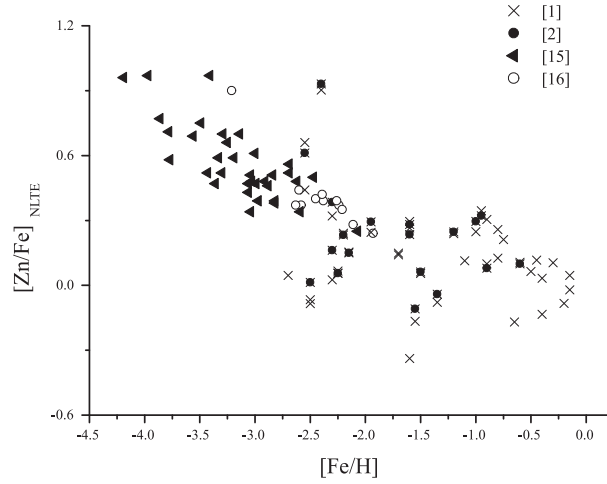


Рис. 3. Зависимость $[Zn/Fe]$ от $[Fe/H]$ для звезд из работ [1, 2, 15, 16]

3. Обсуждение результатов и заключение

Расчеты содержаний железа и цинка показали, что не-ЛТР-поправки возрастают с ростом дефицита металлов у звезд. Это происходит из-за эффектов сверхионизации, как это было показано в работе [17]. Ионизация атомов возрастает с уменьшением $[Fe/H]$, так как эффекты бланкетирования уменьшаются. Это приводит к ослаблению спектральных линий металлов и тем самым к положительным не-ЛТР-поправкам к содержанию элементов.

Наши исследования подтвердили вывод, сделанный ранее в работе [3], что тренд $[Zn/Fe]$ от металличности звезд присутствует во всех рассматриваемых случаях (как ЛТР, так и не-ЛТР). Мы получили различные наклоны кривых в зависимости от рассматриваемых методов оценки содержания. Отказ от использования не-ЛТР-оценок содержаний элементов может привести к неверным значениям трендов химических элементов от металличности звезд. Хотя мы и получили приблизительно линейный характер для рассматриваемых выборок звезд, но если подключить звезды с более широким диапазоном металличностей, то данная зависимость приобретает явно нелинейный характер. На рис. 3 представлены данные из работ [1, 2, 15, 16]. Не-ЛТР-оценка содержания цинка была произведена нами.

Металличности звезд $[\text{Fe}/\text{H}]$ приняты согласно указанным выше работам. Рисунок показывает, что, действительно, с уменьшением металличности относительное содержание цинка растет нелинейно.

В заключение обобщим результаты работы.

Проведены исследования поведения содержаний железа и цинка у карликов и гигантов гало с дефицитом металлов. Отклонения от ЛТР возрастают с уменьшением металличности в обоих случаях. ЛТР-поправки к содержанию Fe и Zn при $[\text{Fe}/\text{H}] = -4.0$ могут достигать $+0.30$ и $+0.35$ соответственно.

Выявлено резкое уменьшение относительного содержания цинка с ростом металличности. В звездах-карликах этот тренд более выражен. Градиент падения $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ с ростом металличности наблюдается как при ЛТР-, так и при не-ЛТР-оценках содержаний. При уменьшении $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$ величина $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ растет нелинейно. При изучении зависимостей содержаний элементов от металличности необходимо учитывать не-ЛТР-эффекты.

Summary

U.Sh. Bayazitov. On the Abundance of Iron and Zinc in Metal-Poor Stars.

We have obtained non-LTE zinc and iron abundances for two halo stellar groups with low metallicities. The non-LTE abundance corrections are increased with metallicity depletion. The dependence of $[\text{Zn}/\text{Fe}]$ on $[\text{Fe}/\text{H}]$ is discussed. It has been found that zinc relative abundance grows nonlinearly with the decrease of metallicity in a wide range from 0 to -5 .

Key words: metal-poor stars, non-LTE calculations, stellar chemical abundances.

Литература

1. *Snedden C., Gratton R.G., Crocker D.A.* Trend in copper and zinc abundances for disc and halo stars // *Astron. Astrophys.* – 1991. – V. 246, No 2. – P. 354–367.
2. *Mishenina T.V., Kovtyukh V.V., Soubiran C., Travaglio C., Busso M.* Abundances of Cu and Zn in metal-poor stars: Clues for Galaxy evolution // *Astron. Astrophys.* – 2002. – V. 396, No 1. – P. 189–201.
3. *Bayazitov U.Sh., Thevenin F.* About trend in zinc stellar abundances with metallicity // *Odessa Astron. Publ.* – 2007. – V. 20, No 1. – P. 12–15.
4. *Kurucz R.L.* A new opacity-sampling model atmosphere program for arbitrary abundances. Presented at IAU Colloquium 138 // *Peculiar versus Normal Phenomena in A-type and Related Stars* / Eds. M.M. Dworetsky, F. Castelli, R. Faraggiana / *A.S.P. Conf. Ser.* – 1993. – V. 44. – P. 87–97.
5. *Nave G., Johansson S., Learner R., Thorn A., Brault J.* A new multiplet table for Fe I // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 1994. – V. 94, No 1. – P. 221–459.
6. *van Regemorter H.* Rate of collisional excitation in stellar atmospheres // *Astrophys. J.* – 1962. – V. 136. – P. 906–915.
7. *Аллен К.У.* Астрофизические величины. – М.: Мир, 1977. – 446 с.
8. *Ситон М.* Атомные и молекулярные процессы. – М.: Мир, 1963. – 777 с.
9. *Steenbock W.* Statistical equilibrium of Fe I/Fe II in cool stars // *Cool stars with excesses of heavy elements.* – Dordrecht: Reidel, 1997. – P. 231–235.
10. *Bautista M.* Atomic data from the IRON Project. XX. Photoionization cross-sections and oscillator strengths for Fe I // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* – 1997. – V. 122. – P. 167–176.

11. *Bayazitov U.Sh.* On the effect of line blanketing on the Fe I line intensities in the solar, Arcturus and Procyon spectra // *Astron. Astrophys. Trans.* – 2003. – V. 22, No 6. – P. 855–859.
12. *Грей Д.* Наблюдение и анализ звездных атмосфер. – М.: Мир, 1980. – 496 с.
13. *Anstee S.D., O'Mara B.J., Ross J.E.* A determination of the solar abundance of iron from the strong lines of FeI // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1997. – V. 284, No 1. – P. 202–212.
14. *Carlsson M.* A computer program for solving multi-level non-LTE radiative transfer problems in moving or static atmospheres: Upps. Astron. Obs., Rep. No 33. – Uppsala, 1986. – 165 p. – URL: <http://folk.uio.no/matsc/mul22/report33.pdf>, свободный.
15. *Cayrel R., Depagne E., Spite M., Hill V., Spite F., Francois P., Plez B., Beers T., Primas F., Andersen J., Barbuy B., Bonifacio P., Molaro P., Nordstrom B.* First stars V – Abundance patterns from C to Zn and supernova yields in the early Galaxy // *Astron. Astrophys.* – 2004. – V. 416, No 3. – P. 1117–1138.
16. *Nissen P.E., Akerman C., Asplund M., Fabbian D., Kerber F., Kaufl H.U., Pettini M.* Sulphur and zinc abundances in Galactic halo stars revisited // *Astron. Astrophys.* – 2007. – V. 469, No 1. – P. 319–330.
17. *Боярчук А.А., Любимков Л.С., Сахибуллин Н.А.* Эффекты отклонения от ЛТР в атмосферах F-гигантов. Повышение ионизации атомов FeI // *Астрофизика.* – 1985. – Т. 22. – С. 339–356.

Поступила в редакцию
14.12.10

Баязитов Урал Шамсетдинович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры ОНД Уфимского государственного нефтяного технического университета.
E-mail: bayazit@mail.ru